第 37 卷第 2 期
2017 年 1 月
生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.2
Jan.,2017

DOI: 10.5846/stxb201508061661
张鹏霞,叶清,欧阳芳,彭龙慧,刘兴平,郭跃华,曾菊平.气候变暖、干旱加重江西省森林病虫灾害.生态学报,2017,37(2):639-649.
Zhang P X, Ye Q, Ouyang F, Peng L H, Liu X P, Guo Y H, Zeng J P.Global warming and droughts aggravates forest damage resulting from pests and diseases in Jiangxi Province.Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):639-649.

气候变暖、干旱加重江西省森林病虫灾害

张鹏霞[1],叶　清[1],欧阳芳[2],彭龙慧[1],刘兴平[1],郭跃华[3],曾菊平[1,*]

1 江西农业大学林学院, 南昌　330045
2 中国科学院动物研究所, 北京　100101
3 江西省植保植检局, 南昌　330096

摘要:近 50 年来,气候变化加剧、全球变暖明显、陆地表面趋向干旱,与此同时,森林病虫灾害损失不断增加,两者关系密切。以江西省为研究区域,采集 1961—2010 年气温、湿度、日照等气候要素及 1992—2010 年森林病虫灾害发生面积、程度数据,获知研究区过去 50 年年均气温、冬季均温都在以 0.16℃/10*a*、0.27℃/10*a* 速率在上升,而年均相对湿度则以-0.45%/10*a* 的速率在下降,显示其气候变暖、干旱化趋势显著。同时,其森林病虫灾害面积则以 58125hm^2/10a 速率扩增。研究以相关分析、主成分分析法对所选 24 个气候要素降维、筛选,以逐步回归法构建模型,以小波分析研究区内时空变化等分析两者关系。得到 16(与病害发生)或 17(与病虫害与虫害发生)个显著相关气候要素,最大正相关要素为夏季均温滑动均值等,而最大负相关要素三者均为温湿系数滑动均值(温湿系数=年均相对湿度 / 年均温);获得 4 或 5 个主成分,而代表温度或温湿度联合变量特征主成分贡献率最高(病虫害、虫害:41.43%,病害:42%);建立 3 个以森林病虫灾害为纵轴、温湿系数滑动均值作横轴且具预测能力的最优回归模型($Y_{病虫害}=3.582\times10^6-7.750\times10^5X$、$Y_{虫害}=-6.375\times10^5X+2.95\times10^6$ 与 $Y_{病害}=-1.375\times10^5X+6.321\times10^5$),其线性拟合度分别为 77.9%、79.1%与 56.7%,平均预测准确率分别为 66.2%、68.6%、47.9%,而研究区温湿系数滑动均值过去 50 年在显著下降,并在 1993 年后转向负距平。这说明气候变暖与环境干旱化对区内森林病虫灾害发生具驱动作用,促使其发生加重,尤其在进入 20 世纪 90 年代后表现更烈。得知温湿系数滑动均值具 29a 周期变化,若以 1993 年为起始,不考虑非气候要素作用,则其病虫害加重态势将持续到 2022 年。在空间上,过去 50 年赣南温湿系数滑动均值最低,预判其森林病虫灾害将较其他区域发生更重,而赣东、北温湿系数滑动均值倾向率最高,预判其森林病虫灾害发生的变动性可能更大。以上结果说明,气候变暖与环境干旱加重江西省森林病虫灾害,赣南应为重点防治工作区域,要加强赣东、北的监测预警工作。

关键词:多年; 全球变暖; 干旱; 森林病虫灾害; 驱动作用; 区域性

Global warming and droughts aggravates forest damage resulting from pests and diseases in Jiangxi Province

ZHANG Pengxia[1], YE Qing[1], OUYANG Fang[2], PENG Longhui[1], LIU Xingping[1], GUO Yuehua[3], ZENG Juping[1,*]

1 *Department of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang* 330045, *China*
2 *Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*
3 *Plant Protection and Quarantine Bureau of Jiangxi, Nanchang* 330096, *China*

Abstract: Over the past 50 years, the climate has changed rapidly with global warming and land surface drying, which has been accompanied by increased forest loss and damage resulting from pests and diseases. Climate data (e.g., air temperature, relative humidity, and sunshine data) from 1961 to 2010 showed that the climate in the Jiangxi Province was

基金项目:环保部专项资助项目(STSN-04-04)
收稿日期:2015-08-06;　　**网络出版日期**:2016-06-13
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: zengjupingjxau@163.com

warming significantly, with the annual mean temperature increasing by 0.16°C per 10 years, and the winter mean temperature rising by 0.27°C per 10 years. The Jiangxi Province climate was also drying throughout this period (annual mean relative humidity decreased −0.45% per 10 years). In addition, forest pests and disease occurrence from 1992 to 2010 showed that in Jiangxi, the area affected by of forest diseases and pests increased significantly, with 58,125 hm^2 per 10 years. Pearson correlation and principal component analyses showed that 16 (for forest diseases) or 17 (for forest pests) climate elements were significantly related to the forest loss. From these individual elements, the most positively correlated was a 9-year sliding average of summer mean temperature, and the most negatively correlated component was a 9-year sliding average of hydrothermal coefficient (annual mean temperature / annual mean relative humidity). Amongst the four or five principal components, the variables temperature and temperature-humidity contributed most to explaining forest area loss (41.43% and 42.0%, respectively). In stepwise regression analyses, three optimal regression models (Total: $Y = 3.582 \times 106 - 7.750 \times 10^5 X$, forest pest: $Y = -6.375 \times 10^5 X + 2.95 \times 10^6$, forest diseases: $Y = -1.375 \times 10^5 X + 6.321 \times 10^5$) were analyzed to describe the forest loss (Y) by the 9-year sliding average of temperature humidity coefficient (X). The three models showed a linear fit of 77.9%, 79.1%, and 56.7% and a prediction accuracy of 66.2%, 68.6%, and 47.9%, respectively. A declining trend in the sliding average of temperature humidity coefficient was observed over the past 50 years, for which the anomaly transferred from positive to negative in 1993. This indicates that climate warming and droughts could have aggravated the forest loss and damage over the past 50 years, especially after 1990s. A wavelet analysis showed a 29-year periodicity in the temperature humidity coefficient. If this anomaly started in 1993, the forest loss trend could potentially be relieved by the end of 2022. In Jiangxi, the temperature humidity coefficient significantly increases from the south to the north, suggesting that forest diseases and pest disasters should be more extreme in Gan Nan than in other areas. In addition, since the change rate of climate warming or drought was higher in Gan Dong and Gan Bei, a high variability of forest diseases and pest disasters can be expected there in the future. Overall, our results suggest that climate warming and environmental drought aggravates forest diseases and pest disasters in Jiangxi. They furthermore emphasize that Gan Nan could be a key area in preventing and controlling the effects of forest diseases and pest disasters, whereas the monitoring efforts in Gan Dong and Gan Bei should be increased.

Key Words: long-time; global warming; droughts; forest loss generated by pests and diseases; driving effect; regionality

20 世纪以来,全球地表升温加快,过去 50 年升温速率是过去 100 年的 2 倍[1],20 世纪 90 年代是近百年来最暖的 10 年[2-3],且过去 30 年的每个 10a 地表平均温度都高于 1850 年以来的任何一个 10a 等[4]。伴随气候变化加剧、全球变暖明显、及陆地表面趋向干旱化[5]等,各类灾害频繁发生(如森林灾害[6-8])、风险上升、损失加重[9-10]。森林生物灾害是破坏森林生态系统,降低“地球绿肺”功能的重要因素,在气候变暖驱动下,其破坏力在增强[8],但仍待提供更多证据。据范霍夫定律,气候变暖可促使生物发育速率加快、生殖力增强、存活率尤其是越冬存活率提高,从而提高次年发生基数水平。气候变暖也可促使有害生物适生区变宽,发生始见期、迁飞期、高峰期提前,年生育期延长、发生代数增加,爆发周期缩短,种间关系动荡复杂等,从而使生物灾害复杂多变、程度加重[11],损失因而呈递增趋势[12-13]。研究多年气候变化与生物灾害关系,有助于了解气候变化背景下生物灾害发生规律,依据关键要素预测未来灾害动态,可为有害生物预警与防控提供重要参考。然而,森林地理分布及其生态系统服务多呈地带性、区域性特征[14-15],需选定一个区域,研究其内气候变化对森林生而物灾害的影响,获得具一定代表性的研究案例。

江西省地处亚热带季风气候区,森林生态系统发育良好,覆盖率高。区内气候变化大,气象灾害多且发生广泛,如夏秋干旱、极端低温等发生频繁[16]。1958—2009 年区内年均气温以 0.16℃/10a 速率升高[17],同时,森林病虫灾害面积近些年也以每年 4440.173hm^2 在增加。一些研究认为年均气温上升,尤其是暖冬,会导致森林病虫灾害加重[18],如杨干象、美国白蛾、松纵坑切梢小蠹等森林害虫灾害或因 1 月份暖温而加重[19]。而

一些害虫爆发可能由某些气候要素引发,如在干旱胁迫与气候干热作用下,意大利阿尔卑斯山地区的云杉叶蜂易爆发成灾[20],锈色粒肩天牛也可能因年份降水量少、温湿系数低等因素而爆发成灾[21],马尾松毛虫发生则受降水[22]、相对湿度、最大风速影响更甚,且据此构建预测模型准确率可达75%[23]。显然,各类病虫害对气候变化的响应并非相同,这增加了二者关系的复杂性。江西省有472种森林生物灾害,其中易造成危害者70余种,严重危害者20余种,包括松材线虫病、萧氏松茎象、马尾松毛虫、思茅松毛虫、黄脊竹蝗、松褐天牛、星天牛、粒肩天牛、云斑白条天牛、华竹毒蛾、刚竹毒蛾、松针褐斑病、油茶炭疽病、杨树锈病、加拿大一枝黄花等。另外,当地一些次生性有害生物种类近些年的发生点、面也在变化,在部分地段爆发成灾,而少数偶发性种类也在部分区域频繁发生并成灾。总体上,该区森林病虫灾害正严重影响着林业发展,如2010年其森林生物灾害面积57586hm^2,直接经济损失8416万元,生态服务价值损失34570万元[24]。因此,摸清气候变化背景下森林病虫灾害的变化规律,无疑将有利于森林保护工作的科学实施,确保森林生态系统健康发展。目前,较多研究专注于温度、降雨、相对湿度等单一气候要素变化对森林病虫灾害的影响,而针对气候的长期综合作用的研究较少。为此,本文通过采集江西省过去多年的气候综合变化(如温度、相对湿度、降水量等要素均值、变率等数据)与森林病虫灾害发生数据,揭示前者对后者发生发展的影响及诱变规律,为当地及周边省份林业病虫灾害防控工作提供参考。

1　研究方法

1.1　研究区域

以江西省为研究区域,即24°29′—30°04′N,113°34′—118°28′E间。其地处典型亚热带季风气候区,气象灾害种类多、频率高[16],为南方林业重点区域之一,森林病虫灾害频繁,年均发生30万hm^{2}左右,最高可达50万hm^2。

1.2　数据采集、整理

采集研究区内南昌、吉安、庐山、景德镇、玉山、鄱阳、修水、贵溪、樟树、南城、宜春、广昌、遂川、赣州和寻乌15个气象站点(图1)1961—2010年间的降水、气温、相对湿度、日照时数等地面气候资料日值数据(自中国气象数据中心 http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html,2014.11登录),从全国、江西林业统计年鉴或资料中采集江西省森林病虫灾害1992—2010年间发生面积(包括病虫害、病害、虫害面积)及1998—2010年间轻、中、重度面积数据。对于降水类数据,先对漏测或降水值进行检查,以最小二乘法对缺失值进行插值处理后,修正固态降水值。同样地,分析前对其他数据也都用最小二乘法对缺失值进行插值处理。以上所选气象指标,既考虑其每年的均匀变化(X均值,图2),也考虑其短期的突变($Y_{2max}-Y_{1max}$,图2),同时,采用滑动滤波法[20]进行平滑处理,以确保代表研究区内多年的气候状态。从而,使得各项气象指标在均值、滑动均值、变率多个层面整理分析。而且,为确保滑动均值以时间序列中项加入到时间坐标,采用9a(9年)滑动平均方式(10a为1个年代,但滑动均值年数通常为奇数)来显示气候要素均值、均方差、变差系数的变化趋势。滑动均值:

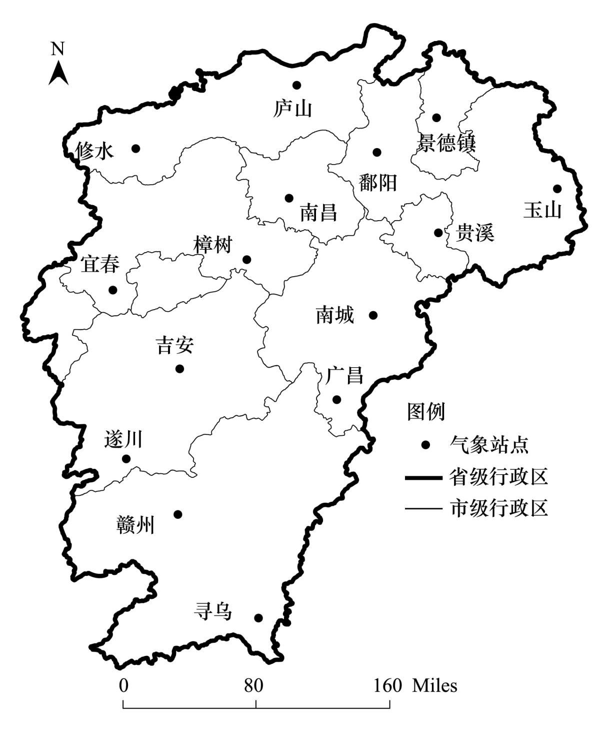


图1　江西省气象资料日值数据采集站点

Fig.1　Weather data sampling sites of Jiangxi Province

$$\bar{X}=\frac{\sum_{t-4}^{t+4}X_t}{9}$$

变率:

$$V_p=\frac{S}{\bar{X}}=\mathrm{SQRT}\left(\sum_{t-4}^{t+4}(X_t-\bar{X}_{(t-4,t+4)})^2/9\right)/\bar{X}_{(t-4,t+4)}$$

式中,X 表示气候要素,t 表示年份,t+4 表示 t 年份向前滑动 4a,t−4 表示 t 年份向后滑动 4a。

1.3 气候要素确定与筛选

气候变化是各类气候要素均值或离差变化的综合,即气候基本状态在变化。如图 2 所示,均值向左偏移则状态下降,向右偏移则上升;而某气候要素变差系数(或变率)的变化幅度大小(变幅)[25](图 2)则意味着极端气候事件发生频率、强度的变化[26-27]。本文选择温度、相对湿度、降水、日照等气候要素,包括年平均气温、夏季均温(6—8 月)、冬季均温(12 月至次年 2 月)、温差(夏季均温 −冬季均温)、年降水量、年均相对湿度、温湿系数(年均相对湿度 / 年均温)、年均日照时数均值、9a 滑动变率、9a 滑动均值 24 个气候要素多年数据。为避免共线性干扰,先将所有气候要素与森林病虫灾害发生面积进行相关分析后,筛选出与之显著相关者进行主成分分析,之后选择各主成分中载荷值最大者为自变量、森林病虫灾害发生面积作因变量,以逐步回归法构建预测模型,最终获得影响森林病虫灾害的重要气候要素。

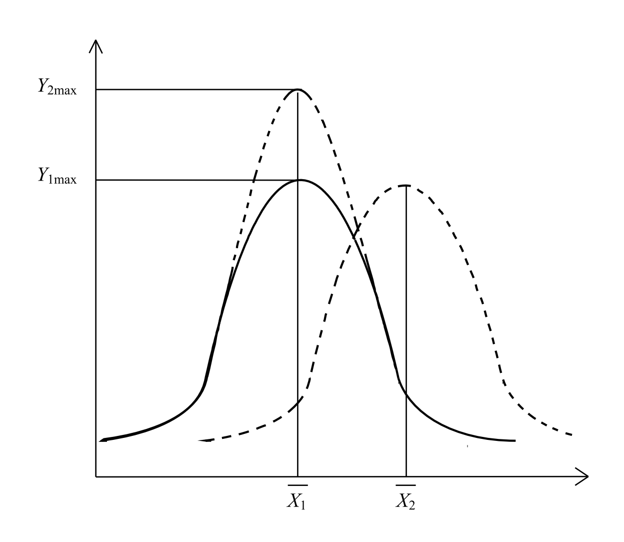


图 2 均值(X)与变率($Y_{2max}-Y_{1max}$)示意图

Fig.2 Sketch map of mean(X) and variability($Y_{2max}-Y_{1max}$)

1.4 气候要素时空特征分析

在线性倾向分析中,用 y_i表示样本量为 n 的某一气候要素,用 t 表示 y_i所对应的年份,建立关于 x_i、t_i的一元线性回归方程 $y_i=at_i+b$ ($i=1,2,\cdots,n$;a 为回归系数,b 为回归常数),用最小二乘法估计 a 和 b[25],即 $a=\dfrac{\sum_{i=1}^{n}y_it_i-\frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n}y_i)(\sum_{i=1}^{n}t_i)}{\sum_{i=1}^{n}t^2{}_i-\frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n}t_i)}$, $b=y-b\bar{t}$, $\bar{y}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i$, $\bar{t}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}t_i$;$a$×10 表示气候倾向率,用于定量描述气候序列的变化趋势、特征,a 为正数表示气候要素 y 呈上升趋势,反之则呈下降趋势。另外,用气候异常指数来评价气候要素是否超出正常范围[28],以年距平大于或小于 1.5 个标准差表示异常偏高或异常偏低,确定异常现象出现的时间。

为把握研究区气候时空变化特征、规律,对森林病虫灾害轻、重灾区及趋势进行预判,以回归分析气候倾向率,并基于 Matlab、ArcGIS 软件,用小波分析以上相关气候要素的周期性及其空间变化动态。数据统计分析均用 SPSS 17.0 软件完成。

2 结果分析

2.1 气候对森林病虫灾害的影响与趋势

2.1.1 森林病虫灾害发生趋势

由表 1 可知,研究区森林病虫灾害在过去多年间处于明显上升态势,虫害、病害及病虫害面积不断扩大,线性趋势显著(表 1)。例如,区内森林病虫灾害面积在 1992—2010 年间平均以 58,125hm²/10a 的速度增加。然而,新增受害面积多为病虫灾害轻度或中度发生区,而重度受害面的增长趋势不明显。

表 1　1992/1998—2010 年江西省森林病虫灾害发生趋势与线性方程

Table 1　Linear equation and trend of forest diseases and pest of Jiangxi Province during 1992/1998 to 2010

发生 Occurrence (Y,hm²次)		年份(X) Year	线性方程 Linear Equation	R^2	趋势 Trend
病虫害 Diseases and Pest	总发生 Total	1992—2010	$Y=2.168\times10^4X-4.315\times10^7$	0.825	↑ **
	轻度发生 Mild level	1998—2010	$Y=1.996\times10^4X-3.9811\times10^7$	0.777	↑ **
	中度发生 Moderate level	1998—2010	$Y=2.846\times10^3X-5.646\times10^6$	0.441	↑ *
	重度发生 Serious level	1998—2010	$Y=2.501\times10^3X-4.985\times10^6$	0.300	-
病害 Diseases	总发生 Total	1992—2010	$Y=3.474\times10^3X-6.917\times10^6$	0.662	↑ **
	轻度发生 Mild level	1998—2010	$Y=3.258\times10^3X-6.493\times10^6$	0.531	↑ *
	中度发生 Moderate level	1998—2010	$Y=-100.863X+2.073\times10^5$	0.011	-
	重度发生 Serious level	1998—2010	$Y=-238.027X-4.750\times10^5$	0.181	-
虫害 Pest	总发生 Total	1992—2010	$Y=1.820\times10^4X-3.623\times10^7$	0.828	↑ **
	轻度发生 Mild level	1998—2010	$Y=1.670\times10^4X-3.331\times10^7$	0.798	↑ **
	中度发生 Moderate level	1998—2010	$Y=1.947\times10^3X-5.853\times10^6$	0.502	↑ *
	重度发生 Serious level	1998—2010	$Y=2.262\times10^3X-4.510\times10^6$	0.284	—

* $P<0.05$; ** $P<0.001$;-:不显著;↑:上升;↓:下降

2.1.2　气候要素变化对森林病虫灾害的影响

研究区气候变暖及干旱化趋势明显,如过去 50 年(1961—2010)其年均气温、冬季均温分别以 0.16℃/10a($Y_1=0.0174X-34.454$,$R^2=0.3239$,$P<0.001$,Y 为年均温均值,X 为年份)、0.27℃/10a($Y_1=0.0283X-30.7366$,$R^2=0.152$,$P<0.001$,Y 为冬季均温均值,X 为年份)速率在升高,而年均相对湿度则以-0.45%/10a($Y=-0.0429X+85.199$, $R^2=0.09646$, $P=0.028$,Y 为相对湿度均值,X 为年份)的速率在下降。并且,1992—2010 数据(表 2)也显示年均温均值、年均温滑动均值、夏季均温滑动均值、夏季均温均值等显著上升,而相对湿度均值、年降水量滑动均值、相对湿度滑动均值等则显著下降。其他如日照时数滑动均值、年降水量变率、冬季均温变率、相对湿度变率、温差变率、温湿系数变率等气候要素也在显著上升(表 2),温湿系数均值、温湿系数滑动均值则在显著下降。

表 2　气候要素变化及其与森林病虫灾害 Pearson 相关性

Table 2　Trends of climate elements and Pearson correlation between them and forest diseases and pest

气候要素 Climate elements	R^2	趋势 Trend	相关系数 Correlation coefficient(r) 病虫害 Pest and disease	虫害 Pest	病害 Disease
夏季均温滑动均值 Summer mean temperature sliding average	0.622	↑ **	0.838 **	0.837 **	0.647 **
日照时数滑动均值 Sunshine duration sliding average	0.515	↑ *	0.813 **	0.839 **	0.612 *
年降水量变率 Annual precipitation variability	0.761	↑ **	0.808 **	0.835 **	0.609 *
冬季均温变率 Winter mean temperature variability	0.925	↑ **	0.805 **	0.805 **	0.709 **
年均温滑动均值 Annual mean temperature sliding average	0.979	↑ **	0.799 **	0.800 **	0.700 **
相对湿度变率 Relative humidity variability	0.777	↑ **	0.742 **	0.769 **	0.547 *
温差变率 Temperature difference variability	0.866	↑ **	0.718 **	0.733 **	0.576 *
夏季均温均值 Mean summer average temperature	0.393	↑ *	0.636 **	0.614 **	0.674 **
温湿系数变率 Hydrothermal coefficient variability	0.741	↑ **	0.601 *	0.629 *	0.421
年均温均值 Annual mean temperature average	0.511	↑ *	0.586 **	0.568 *	0.616 **
温差均值 Temperature difference average	0.050	-	0.37	0.336	0.491 *
日照时数变率 Sunshine duration variability	0.608	↑ *	0.569 *	0.604 *	0.362
相对湿度均值 mean relative humility	0.396	↓ *	-0.621 **	-0.632 **	-0.506 *
年均温变率 Annual mean temperature variability	0.162	-	-0.630 *	-0.646 **	-0.494
温湿系数均值 Hydrothermal coefficient average	0.623	↓ **	-0.716 **	-0.714 **	-0.654 **
年降水量滑动均值 Annual precipitation sliding average	0.461	↓ *	-0.763 **	-0.789 **	-0.572 *
相对湿度滑动均值 Relative humidity sliding average	0.687	↓ **	-0.877 **	-0.890 **	-0.727 **
温湿系数滑动均值 Hydrothermal coefficient sliding average	0.926	↓ **	-0.883 **	-0.890 **	-0.753 **

* $P<0.05$, ** $P<0.001$,-不显著,↑上升,↓下降

不同气候要素对森林病虫灾害影响各异,24 个气候要素中,找到 17(病虫害与虫害)或 16(病害)个与森林病虫灾害发生显著相关要素(表 2),其中,显著正相关要素包括夏季均温滑动均值、日照时数滑动均值、年降水量变率、冬季均温变率、年均温滑动均值、相对湿度变率、夏季均温均值、温湿系数变率、年均温均值、温差变率(与病虫害、虫害)、日照时数变率(与病虫害、虫害)、温差均值(与病害);而温湿系数滑动均值、相对湿度滑动均值、年降水量滑动均值、温湿系数均值、年均温变率、相对湿度均值则为显著负相关要素。其中,与森林病虫害、虫害、病害发生的最大正相关要素分别为夏季均温滑动均值($r=0.838$)、日照时数滑动均值($r=0.839$)、冬季均温变率($r=0.709$),而三者的最大负相关要素均为温湿系数滑动均值(病虫害:$r=-0.883$,虫害:$r=-0.890$,病害:$r=-0.753$),可见,温湿系数滑动均值等在负向上可能对研究区内森林病虫灾害发生及趋势形成起着更关键的作用。

2.1.3 影响森林病虫灾害的关键气候要素及其影响趋势

用主成分分析法,对以上与病虫害、虫害发生显著相关(17 个,表 2)及与病害发生显著相关(16 个,表 2)的要素进一步合并、筛选,前者获得 4 个主要成分(表 3,即 Y_1、Y_2、Y_3、Y_4),其特征根贡献率分别为 41.43%、13.9%、13.66%、7.85%,累积贡献率为 76.84%(KMO=0.647, $X^2=16359.97$, $df=136$, $P<0.001$)。主成分 Y_1 主要包含温湿系数滑动均值、年均温滑动均值、年均温均值、温湿系数均值、夏季均温滑动均值、夏季均温均值、冬季均温变率、年均温变率、降水滑动均值,主要体现温度或温湿度联合变量特征;Y_2 主要包含相对湿度滑动均值、相对湿度均值,体现湿度变量特征;Y_3 主要包含日照时数变率、温湿系数变率、相对湿度变率,体现气候要素变率变量特征;Y_4 主要包含降水量变率、日照时数滑动均值,体现日照变量特征。而后者则获得 5 个主要成分(表 3,即 Y_1、Y_2、Y_3、Y_4、Y_5),它们的特征根贡献率分别为 42.00%、20.81%、8.04%、6.91%、6.37%,累积贡献率为 84.13%(KMO=0.660, $X^2=16286.514$, $df=120$, $P<0.001$)。与上面相似,其 Y_1 也主要体现温度或温湿度联合变量特征,Y_2 主要体现湿度变量特征,Y_3 主要体现气候要素变率变量特征,Y_4 主要体现降水量大小年变化与日照变量特征,而 Y_5 因只包含温差均值,故代表温差变量特征。

表 3 四/五主成分与气候要素荷载矩阵

Table 3 Four / five principal components and matrix of climate elements

气候要素 Climate elements	四主成分 Four Principal components				五主成分 Five Principal components				
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
温湿系数滑动均值 Hydrothermal coefficient sliding average	0.980	0.101	−0.040	0.025	−0.983	0.105	−0.052	−0.006	0.059
年均温滑动均值 Annual mean temperature sliding average	−0.974	−0.005	0.070	−0.064	0.978	−0.010	0.065	−0.014	−0.132
年均温均值 Annual mean temperature average	−0.969	−0.014	0.064	−0.071	0.975	−0.029	0.050	−0.018	−0.160
温湿系数均值 Hydrothermal coefficient average	0.964	0.160	−0.026	0.053	−0.969	0.183	−0.027	0.026	0.069
夏季均温滑动均值 Summer mean temperature sliding average	−0.951	−0.034	−0.027	0.004	0.953	−0.002	0.012	−0.005	0.210
夏季均温均值 Mean summer average temperature	−0.922	−0.078	−0.021	−0.010	0.921	−0.050	0.014	−0.031	0.309
冬季均温变率 Winter mean temperature variability	0.843	−0.150	0.214	0.084	−0.852	−0.055	0.303	0.061	0.070
年均温变率 Annual mean temperature variability	0.638	−0.077	0.218	−0.195	—	—	—	—	—
年降水量滑动均值 Annual precipitation sliding average	0.573	0.092	−0.134	−0.014	−0.565	−0.152	−0.433	0.056	−0.169
相对湿度滑动均值 Relative humidity sliding average	0.073	0.874	−0.174	−0.155	−0.073	0.866	−0.259	−0.151	0.008
相对湿度均值 Mean relative humility	0.067	0.856	−0.076	−0.008	−0.068	0.901	−0.125	0.023	−0.044

续表

气候要素 Climate elements	四主成分 Four Principal components				五主成分 Five Principal components				
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
日照时数变率 Sunshine duration variability	0.012	0.310	0.786	0.075	—	—	—	—	—
温湿系数变率 Hydrothermal coefficient variability	0.191	−0.451	0.743	0.245	−0.194	−0.351	0.720	0.373	0.148
相对湿度变率 Relative humidity variability	−0.118	−0.475	0.661	0.281	0.091	−0.446	0.626	0.382	0.013
温差变率 Temperature difference variability	−0.054	−0.328	0.642	−0.141	0.036	−0.131	0.837	−0.078	−0.097
年降水量变率 Annual precipitation variability	0.054	0.079	0.356	0.766	−0.055	0.020	0.127	0.907	−0.110
日照时数滑动均值 Sunshine duration sliding average	0.005	−0.385	−0.127	0.708	−0.013	−0.331	−0.007	0.507	0.342
温差均值 Temperature difference average	—	—	—	—	0.001	−0.022	0.006	−0.002	0.954

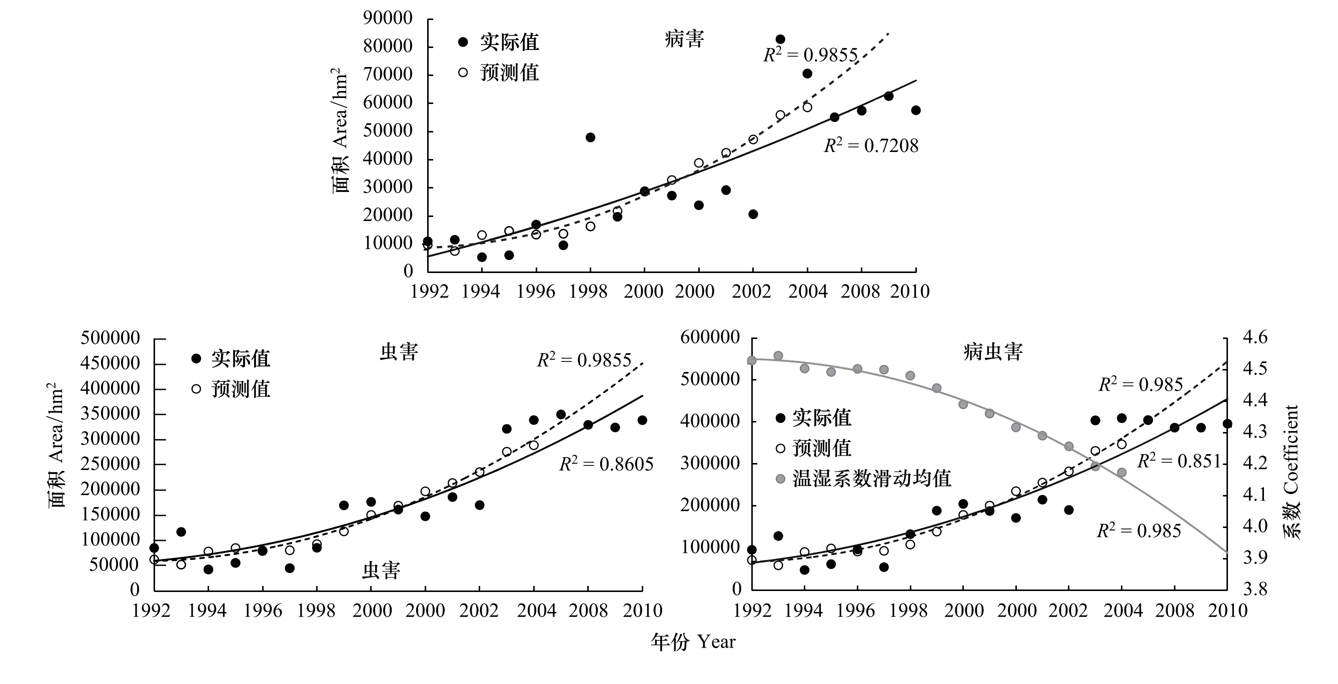


图 3　1992—2010 年江西省温湿系数滑动均值、森林病虫害发生趋势与模型拟合

Fig.3　Model fitting and trend of hydrothermal coefficient sliding average (HCSA), forest diseases and pest of Jiangxi during 1992 to 2010

从以上主成分中,选择荷载最大的温湿系数滑动均值、相对湿度滑动均值、日照时数变率、降水量变率、温差均值作自变量,森林病虫灾害发生作因变量继续进行逐步回归,获得 3 个最优回归方程

$$Y_{病虫害} = 3.582 \times 10^6 - 7.750 \times 10^5\ X (R^2 = 0.779,\ P<0.001)$$

$$Y_{虫害} = -6.375\times10^5 X + 2.95\times10^6 (R^2 = 0.791, F = 49.335, P<0.001)$$

$$Y_{病害} = -1.375\times10^5 X + 6.321\times10^5 (R^2 = 0.567, F = 16.996, P = 0.001)$$

相似地,以上 X 均为温湿系数滑动均值,三个方程的线性拟合度分别为 77.9%、79.1%与 56.7%,模型均具预测能力,而将温湿系数滑动均值回代后,得知其平均预测准确率为 66.2%、68.6%、47.9%(图 3)。因而,与其他气候要素相比,温湿系数滑动均值可能对区内森林病虫灾害发生及趋势形成起着最关键的影响,但二者在研究区内呈显著负向关系,前者在过去几十年间显著下降,而森林病虫灾害发生面积则显著增加(图 3)。

2.2 江西省 1961—2010 年温湿系数时空变化特征

2.2.1 温湿系数变化倾向率与周期性

研究区 1961—2010 年间的温湿系数滑动均值为 4.517,总体呈显著下降趋势($R^2=0.5827$, $P<0.001$,图 4A),每 10 年的线性倾向率为-0.075,且正、负距平转折点在 1993 年(图 4A)。小波方差图(图 4 B)显示:过去 50 年间区内温湿系数变化有 2 个周期,小周期为 2a,大周期为 29a,而以后者为主。小波实部变化图(图 4C)也显示 29a 周期振荡最显著,小波能量图(图 4D)最大值 1.4 也出现在 29a 这一时间尺度位置上。

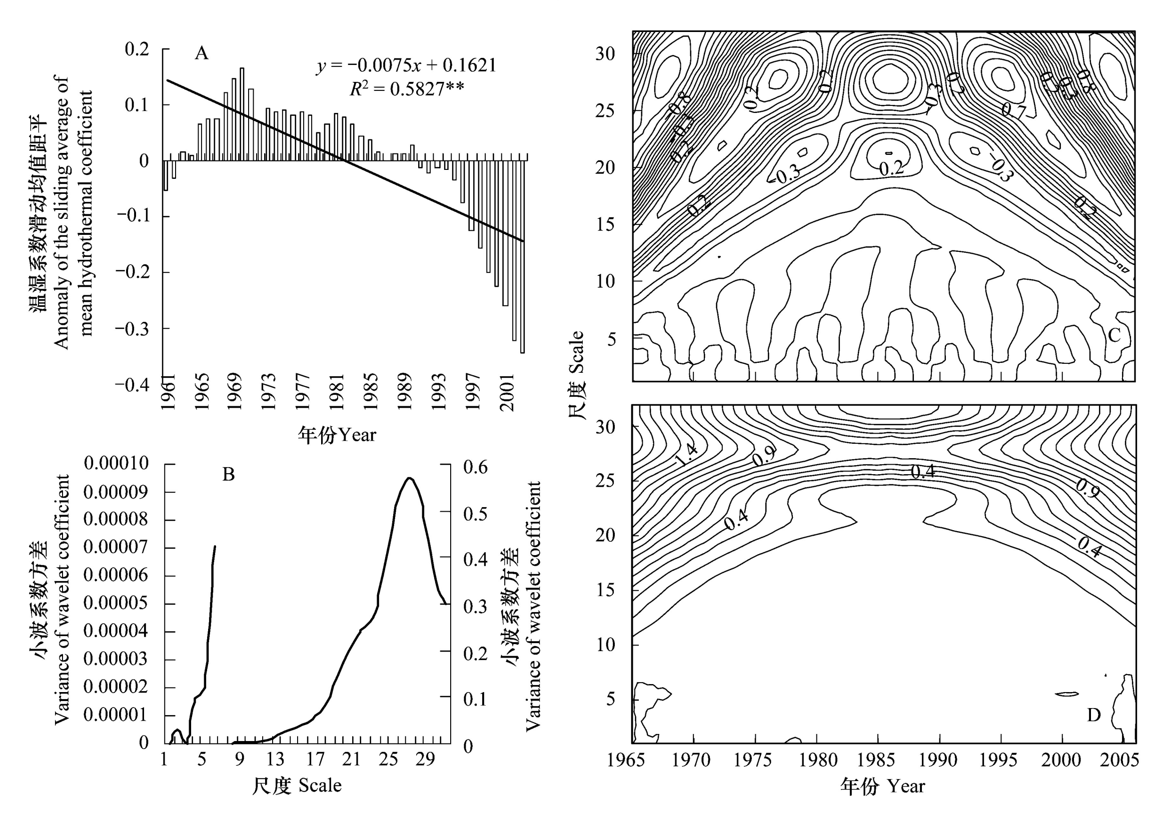


图 4 江西省 1961—2010 年温湿系数滑动均值时间序列变化趋势(A, ** **$P<0.001$)与周期性特征**(B 小波方差图、C 小波实部变化图、D 小波能量图)

Fig.4 Variation, tendency and periodicity of hydrothermal coefficient sliding means during 1961 to 2010 in Jiangxi Province

2.2.2 温湿系数变化倾向率及其空间分布特征

江西省各区县温湿系数差异较大,区域性变化特征显著(图 5)。例如,温湿系数滑动均值总体上沿赣西北(最高 5.59)向赣东南(最低 3.84)递减,在赣州出现明显低值区(图 5A)。另外,各区县 50a 温湿系数滑动均值线性变化倾向率或变化程度则沿赣西、赣南部向赣东、赣北部递增,而在赣州、吉泰盆地的变化程度最低。由此说明,过去 50 年间,赣南高温或干旱更重,而赣北变动性更大。

3 结论与讨论

近 50 年来,气候变化加剧、全球趋于变暖[1,4]、陆地表面趋向于干旱化[5],各类森林灾害频繁发生[6-8],损失加重[9-10]。以森林生物灾害为例,其发生态势近几十年来在我国呈加重趋势,损失也随之增加[12-13]。例如,研究区江西省年均气温、冬季均温 50 年来(1961—2010)分别以 0.16℃/10a[17]、0.27℃/10a 速率升高,已分别升高 0.87℃、1.38℃;然而,其年均相对湿度则以-0.45%/10a 的速率下降。并且,短时间(1992—2010 年)来看,其年均温滑动均值、夏季均温滑动均值等也在显著升高,而年降水量滑动均值、相对湿度均值、相对湿度滑动均值等则在显著下降,这些足以说明研究区气候变暖及干旱化显著。而与此同时,区内森林病虫灾害发生也不断加重,表现在灾害面积扩大、爆发频繁、一些次生性或偶发性害虫局部爆发增多等方面。据范霍夫定律,气候变暖驱使生物发育速率加快、生殖力增强、存活率尤其是越冬存活率提高,以及生物发生始见期、迁飞期、

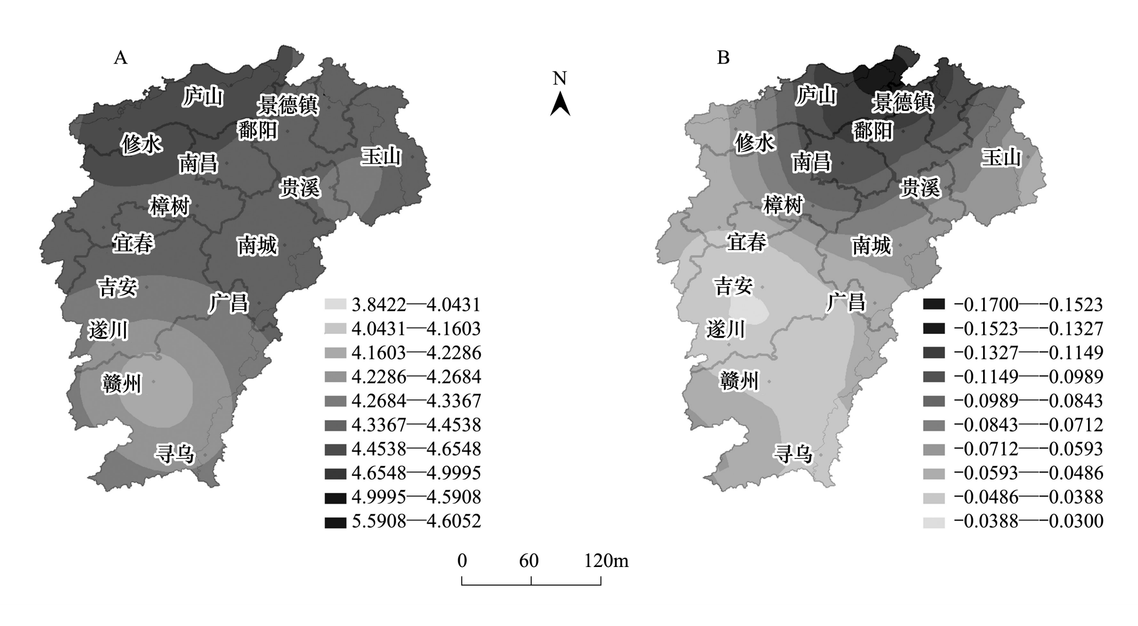


图 5　江西省各区县 1961—2010 年间温湿系数滑动均值(A)及其变化倾向率(B)分布特征

Fig.5　Spatial variation of hydrothermal coefficient sliding average (A) and change trend rate (B)

高峰期提前,年生育期延长、发生代数增加等[11],从而促进害虫发生。而气候变暖也能驱使生物适生区加宽,为次生性或偶发性害虫发生提供有利机会。本次研究支持气候变化、变暖驱使森林病虫灾害加重的观点,如敖淑平[26]等认为大范围流行性、毁灭性病虫害的发生、发展、流行都几乎与气候变化有关,Dukes 等[29]则强调温度上升 3—5℃可加重球蚜、天幕毛虫、蜜环菌根腐病和山毛榉烂皮病对欧鼠李、南蛇藤等植物的侵害,从而破坏森林结构、成分。事实上,本次所选 24 个气候要素有 16(与病害发生)或 17(与病虫害、虫害发生)个显著相关要素,夏季均温滑动均值等为最大正相关,温湿系数滑动均值为最大负相关要素,表明过去几十年的温度上升(尤其是夏季高温)或环境干旱促使着森林病虫灾害发生加重,这与一些研究认为年均气温升高是导致森林病虫灾害加重的重要因素观点一致。但是,部分研究倾向于支持暖冬的重要驱动作用[18],如 1 月份暖温驱使杨干象、美国白蛾、松纵坑切梢小蠹等森林害虫灾害加重[19];而另一部分则倾向于支持夏季高温的重要驱动作用,如 6 月高温是导致洪都拉斯南方松小蠹虫(*Dendroctonus frontalis*)爆发的重要因素之一[27],本研究也支持森林病虫灾害发生更易受夏季高温驱动。

然而,气候变暖与环境干旱的双重或联合作用可能较其单一作用更为强烈。在分析各气候要素对研究区森林病虫灾害发生的影响中,先将所有气候要素与森林病虫灾害发生面积进行相关分析,筛出与之显著相关者(16 或 17 个要素)进行主成分分析,得到 4 或 5 个主成分,从而降低维度、减少共线性干扰。在获得的主成分中,发现代表温度或温湿度联合变量特征的第一主成分贡献率最大(病虫害与虫害:41.43%,病害:42%),该结果支持温度对森林病虫灾害发生具重要影响的观点,而又突显出温湿度联合作用的重要作用。事实上,气候变化对病虫灾害发生影响复杂,因为单个气候要素的变化常会引起其他要素相应地变化,如生物的适宜温度范围可能因湿度变化而偏移,反之亦然,所以即便是不同的温湿度组合也可能产生出近似的生物发生效应[30]。例如,落叶松锉叶蜂的发生就同时受到温度、湿度、降水 3 个气候要素的联合作用[31],同样地,湘西南马尾松毛虫的发生也不是单个气候因子所左右,因为山区温度、湿度和降水都能对其发生产生影响[32]。尽管,从前的一些研究及本次研究结果均支持环境温度变化是影响森林病虫灾害的主要因子的观点。但是,不容忽视的是,环境湿度的变化也可能参与其中或以联合效应发挥作用。事实上,环境干旱对一些害虫发生直接有利,如小陇山林区的葡萄长须卷蛾发生与危害与当地温暖干燥的气候环境密切相关[33],意大利阿尔卑斯山地区的云杉叶蜂易因干旱胁迫或在气候干热条件下爆发成灾[20],而锈色粒肩天牛也多在降水少、温湿系数低的年份爆发成灾[21]。

实际上,在预测模型构建中,也发现温湿系数滑动均值这一综合要素表现最好。例如,经主成分分析后,选择各主成分中载荷值最大者为自变量、森林病虫灾害发生面积作因变量,以逐步回归法构建获得的最优回归预测模型,均是基于温湿系数滑动均值(X)所构建($Y_{病虫害}=3.582\times10^6-7.750\times10^5X$;$Y_{虫害}=-6.375\times10^5X+2.95\times10^6$;$Y_{病害}=-1.375\times10^5X+6.321\times10^5$),且与用主成分回归法所获模型(如 $Y_{虫害}=-3377.397Y_1+1352975.004$)相比,前法所构建的模型拟合度更高(如拟合度 $Y_{虫害}=-6.375\times10^5X+2.95\times10^6$ 为 79.1%,而 $Y_{虫害}=-3377.397Y_1+1352975.004$ 为 62.7%)。作为年均相对湿度与年均温度的比值,温湿系数是反应温湿度联合关系与作用的综合性气候要素,年均相对湿度下降或年均温度上升,或者两种变化同时发生,导致温湿系数下降。研究表明,江西省过去 50 年年均温滑动均值明显上升,而相对湿度均值与相对湿度滑动均值则明显下降,温湿系数滑动均值因此呈显著下降趋势,为一些森林病虫灾害发生创造了有利条件[20-21,33],从而驱使着森林病虫灾害在过去几十年间不断加重。尤其,随着全球在 20 世纪 90 年代进入近百年来最暖的 10a[2-3],温湿系数下降也最为明显,如其滑动均值即在 1993 年转为负距平,驱使着森林病虫灾害深度加重。并且,研究区温湿系数滑动均值具 29a 大周期特征,故若以 1993 年为切入点,则可预判区内森林病虫灾害加重趋势至少维持到 2022 年。另外,研究区温湿系数滑动均值具区域分布特征,如温湿系数滑动均值总体沿赣西北向赣东南递减,并在赣州市及其周边形成一个低值区(图 5A)。尽管赣州、吉泰盆地等地为江西省森林病虫重灾区,但据温湿系数滑动均值线性变化倾向率呈沿着赣西、赣南部向赣东、赣北部递增,可预判随着气候变暖或环境干旱,赣东北森林因病虫灾害而遭受破坏的加重进度将较其他区域更快,换言之,轻灾区的未来森林病虫灾害变动性可能较重灾区更大。

致谢:本文地面气候资料日值数据来自中国气象数据中心,江西农业大学林学院研究生曾城做了大量的数据录入工作,特此致谢。

参考文献(References):

[1] Team C W, Pachauri R K, Reisinger A. IPCC fourth assessment report. Geneva: IPCC, 2007.

[2] Jones P D, Moberg A. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. Journal of Climate, 2003, 16(2): 206-223.

[3] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 宫鹏, 郑循华, 翟盘茂, 张德二, 赵宗慈, 王绍武, 王会军, 罗勇, 陈德亮, 高学杰, 戴晓苏. 气候变化国家评估报告(Ⅰ): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.

[4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2013: the physical science basis // Contribution of Working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[5] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52-58.

[6] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 刘足根. 森林的风/雪灾害研究综述. 生态学报, 2005, 25(1): 148-157.

[7] 仝川, 杨玉盛. 飓风和台风对沿海地区森林生态系统的影响. 生态学报, 2007, 27(12): 5337-5344.

[8] 张星耀, 骆有庆. 中国森林重大生物灾害. 北京: 中国林业出版社, 2003.

[9] Van Aalst M K. The impacts of climate change on the risk of natural disasters. Disasters, 2006, 30(1): 5-18.

[10] 丁文广, 肖俊豪, 汪霞. 气候变化对我国森林自然灾害的影响. 西北林学院学报, 2010, 25(5): 117-120.

[11] 魏书精, 孙龙, 魏书威, 胡海清. 气候变化对森林灾害的影响及防控策略. 灾害学, 2013, 28(1): 36-40, 64-64.

[12] 曾菊平, 曾城, 欧阳芳, 刘兴平, 戈峰. 2000—2010 年全国森林生物灾害发生、损失与趋势分析. 生物灾害科学, 2014, 37(1): 7-12.

[13] 张鹏霞, 曾菊平, 曾城, 彭龙慧. 2000—2010 年全国森林病害发生、损失与趋势分析. 生物灾害科学, 2014, 37(2): 101-108.

[14] 中国森林编辑委员会. 中国森林(第 1 卷). 北京: 中国林业出版社, 1997.

[15] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. 林业科学, 2011, 47(2): 145-153.

[16] 胡菊芳, 张超美, 彭静. 江西省主要气象灾害年代际变化特征分析. 气象与减灾研究, 2007, 30(4): 37-42.

[17] 吴茜, 徐莉莉, 蔡道明, 张海林, 叶护平, 吴宜进. 近 52 年来江西省气候变化特征研究. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2010, 44(4): 686-690.

[18] 赵铁良, 耿海东, 张旭东, 方国飞, 王玉玲, 赵清山. 气温变化对我国森林病虫害的影响. 中国森林病虫, 2003, 22(3): 29-32.

[19] 张梅, 王敏慧, 陈玉光, 李志. 林业有害生物发生率与气象条件关系及预报. 辽宁林业科技, 2010, (4): 24-26, 62-62.

[20] Marchisio C, Cescatti A, Battisti A. Climate, soils and *Cephalcia arvensis* outbreaks on *Picea abies* in the Italian Alps. Forest Ecology and Management, 1994, 68(2/3): 375-384.

[21] 孙丹萍, 徐睿, 梁铁旺, 姚方. 锈色粒肩天牛生态学特性研究. 西北林学院学报, 2007, 22(5): 114-116, 127-127.

[22] 范正章, 陈顺立. 武夷山风景区马尾松毛虫发生趋势与环境因子的相关性. 华东昆虫学报, 2008, 17(2): 110-114.

[23] 费海泽. 干旱背景下影响马尾松毛虫种群的关键因子分析[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.

[24] 沈彩周, 温小遂, 李莉华, 侯佩华, 龙炜, 李国栋. 江西省林业有害生物灾害损失评估. 江西林业科技, 2012, (1): 28-31.

[25] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007.

[26] 敖淑平. 渝东地区近年气候变化与农作物病虫害演替趋势分析. 植物医生, 2008, 21(5): 4-5.

[27] Rojas M R, Locatelli B, Billings R. Climate change and outbreaks of southern pine beetle *Dendroctonus frontalis* in Honduras. Forest Systems, 2010, 19(1): 70-76.

[28] 袁新田, 刘桂建. 1957 年至 2007 年淮北平原气候变率及气候基本态特征. 资源科学, 2012, 34(12): 2356-2363.

[29] Dukes J S, Pontius J, Orwig D, Garnas J R, Rodgers V L, Brazee N, Cooke B, Theoharides K A, Stange E E, Harrington R, Ehrenfeld J, Gurevitch J, Lerdau M, Stinson K, Wick R, Ayres M. Responses of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: What can we predict? Canadian Journal of Forest Research, 2009, 39(2): 231-248.

[30] 戈峰. 现代生态学(第二版). 北京: 科学出版社, 2008.

[31] 曾兵兵. 塞罕坝机械林场落叶松锉叶蜂遥感监测与预测研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.

[32] 黄向东, 陈良昌. 湘西南马尾松毛虫发生规律与环境因子的关系. 湖南林业科技, 2008, 35(5): 19-22.

[33] 许彦平, 姚晓红, 袁伯顺, 姚延峰, 姚晓琳, 包曲灵. 小陇山林区葡萄长须卷蛾危害面积的气象预测研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 81-86.